УДК 66.796.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ И ДИЗЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ СВС-ФИЛЬТРАМИ

В.В. Евстигнеев, А.Л. Новоселов, В.И. Пролубников, Н.П. Тубалов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. г. Барнаул
E-mail: kef@agtu.secna.ru

Разработана математическая модель фильтрации и выгорания сажи, отработавших газов дизелей через пористую поверхность СВС-материалов, полученных на основе оксидов железа и алюминия.

Вводная часть

Очистка отработавших газов в том числе твердых частиц (ТЧ) химических производств и дизельных агрегатов является одной из важнейших экологических проблем и сложной технической задачей решение которой зависит от различных факторов. В числе которых каталитическая очистка различных газов, физические свойства пористого материала. Нами предложена модель процессов фильтрации с использованием материалов, полученных на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), которая позволяет производить фильтрующие блоки для дизелей в соответствии со стандартом ЕВРО-4.

1. Состояние отработавших газов на входе в пористый проницаемый фильтр для их очистки от твердых частиц

Объемный расход отработавших газов через пористый проницаемый фильтр твердых частиц связан с параметрами источника в химическом производстве или дизеля и зависит от следующих из них: коэффициента избытка воздуха α; теоретически необходимого количества воздуха для сгорания 1 кг топлива l_0, $\frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}$; часового расхода топлива дизелем G_T, кг/ч; давления наддувочного воздуха P_K, МПа (для дизелей без наддува $P_K=P_0$); температуры воздуха после компрессора T_K, К (для дизелей без наддува $T_K=T_0$); газовой постоянной для воздуха $R_B=\frac{R}{\mu_B}=\frac{8,314}{28,96}$; μ_B – действительного коэффициента молекулярного изменения. Тогда для четырехтактных двигателей объемный расход отработавших газов определяется по выражению, приведенному в работах В.И. Смайлиса, например [1]:

$$V_{ог}=\frac{\alpha\cdot l_0\cdot G_T\cdot T_K\cdot\mu}{P_K\cdot 10^6} \qquad (1)$$

или $$V_{ог}=4,148\cdot10^{-3}(G_T T_K/P_K)(\alpha+0,0675). \qquad (2)$$

Учитывая, что удельная масса отработавших газов дизелей при 273 К составляет $\gamma_{ог}$=1,3 кг/м³, для другой любой температуры она определяется по известному выражению:

$$\gamma_{тог}=\frac{(\gamma_{ог}\cdot T)}{T_{тог}}.$$

Динамическая вязкость отработавших газов дизеля при T_0=273 К составляет $\mu_{ог}=1,5\cdot10^6$ кгс/м². Для вычисления динамической вязкости отработавших газов при любой температуре $T_{ог}$ удобно использовать эмпирическую формулу Сутерлянда:

$$\mu_{ог}=\mu_0\cdot\left(\frac{(1+C_г)/T_0}{(1+C_г)/T_{ог}}\right)\sqrt{\frac{T_{ог}}{T_0}},$$

где $C_г$ – постоянная отработавших газов, для дизелей $C_г$=173.

Величину кинематической вязкости газов можно определить по выражению:

$$\nu_{ог}=\frac{\mu_{ог}\cdot g}{\gamma_{ог}},$$

где g=9,81 – земное ускорение свободного падения, м/с². Средняя скорость отработавших газов при фильтровании связана с площадью $F_ф$ поверхности фильтра и пористостью ($n_{фм}$):

$$\bar{\upsilon}=\frac{V_{ог}}{F_ф\cdot n_{фм}}.$$

Режим течения определяется числом Рейнольдса. Зная среднюю скорость газов, их плотность $\rho_{ог}$, газовую постоянную $R_{ог}$, динамическую вязкость газов, можно определить число Рейнольдса из выражения:

$$\mathrm{Re}=\frac{2R_{ог}\bar{\upsilon}\rho_{ог}}{\mu_{ог}},$$

Известно, что в капиллярных порах металлокерамических фильтров число Рейнольдса может иметь величины в пределах Re≈0,001...0,1 или $\mathrm{Re}=\bar{\upsilon}\cdot2n_{фм}\cdot\bar{r}/3n_{ог}(1-n_{фм})$.

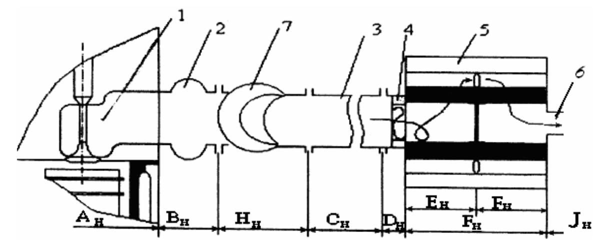


Рис. 1. *Схема трассы выпуска дизеля с фильтром твердых частиц: 1) выпускной канал; 2) выпускной коллектор; 3) соединительный трубопровод; 4) завихритель потока газов; 5) фильтр твердых частиц; 6) выпускной патрубок; 7) турбокомпрессор. Здесь участок $E_н$ – первая ступень очистки; $F_н$ – вторая ступень очистки от твердых частиц*

Систему выпуска дизеля с сажевым фильтром или вернее фильтром твердых частиц можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1.

Система впуска нагревательной печи в химическом производстве масел представлена на рис. 2.

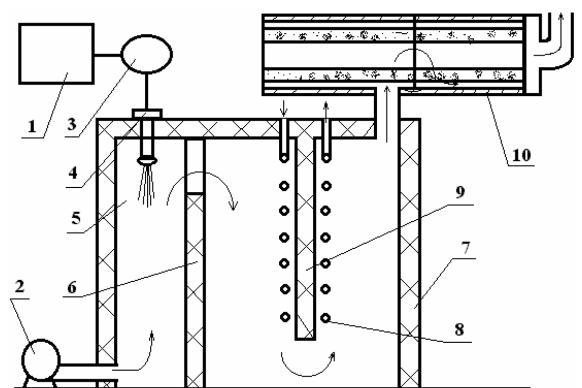


Рис. 2. *Схема процесса выпуска нагревательной печи в химическом производстве масел: 1) бак с топливом; 2) воздуходувка; 3) насос; 4) форсуночное устройство; 5) камера сгорания; 6) перегородка; 7) печь; 8) трубы; 9) экран; 10) фильтр*

Технологическая схема производства резинотехнических изделий представлена на рис. 2, 3, где отмечены этапы вредных выбросов в атмосферу.

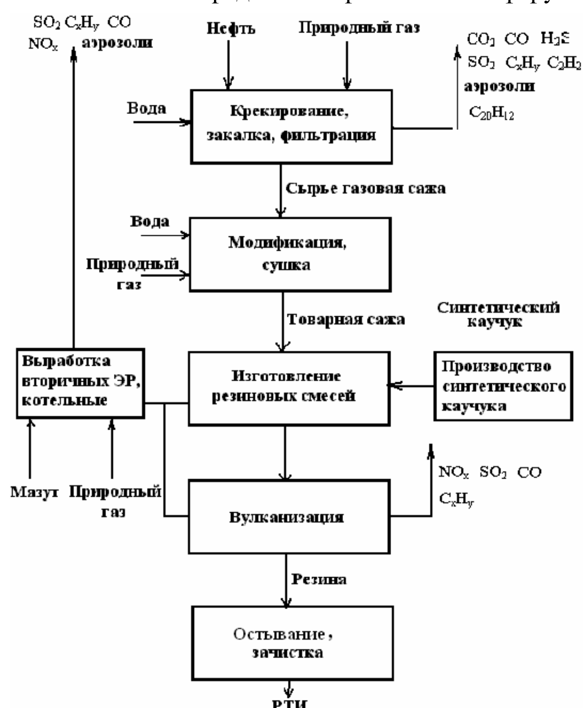


Рис. 3. *Технологическая схема производства резинотехнических изделий*

2. Моделирование процесса фильтрования отработавших газов в пористых проницаемых СВС-блоках

Пористые проницаемые фильтрующие СВС-материалы имеют ряд особенностей, отличающий их от других материалов. Средний диаметр пор в них определяется составом шихты и технологией изготовления, существует некоторая упорядоченность пор, поперечных стенке фильтров, направления пор и различная извилистость последних [2].

Течение отработавших газов в стенке пористого проницаемого фильтра имеет очень сложный характер, так как поток постоянно изменяет направление, огибая соединительные узлы в интерметаллическом каркасе.

Несмотря на существование многослойности в структуре, для СВС-фильтров невозможно использовать модель, предложенную Н.А. Фуксом [3]. А движение отработавших газов не может быть ламинарным по причине структуры и характера потока и структуры пористых фильтров, где присутствуют как поперечные, так и продольные течения у стенки пористого блока.

Процесс фильтрации отработавших газов в пористых материалах можно разделить на несколько этапов, следующих один за другим. Сначала твердые частицы, которые должны быть отделены от потока отработавших газов, подводятся к поверхности фильтра, затем они примыкают к поверхности фильтра, а на следующем этапе проникают в поверхность фильтра и задерживаются в порах. Чем больше размер частицы, тем больше вероятность ее улавливания в пористой стенке.

Движение крупных частиц, например, кокса подчиняется закону Стокса, и для частиц размерами $1 \cdot 10^6 ... 1 \cdot 10^4$ м скорость их осаждения зависит от плотностей $\rho_{тч}$ и $\rho_{ог}$ соответственно твердых частиц и сажи, отработавших газов; $d_{тч}$ – среднего диаметра твердой частицы; $\mu_{ог}$ – динамической вязкости отработавших газов:

$$\upsilon_{тч} = \frac{(\rho_{тч} - \rho_{ог}) g \cdot d_{тч}^2}{18 \cdot \mu_{ог}}.$$

Для очень мелких частиц в силу вступают законы броуновского движения. Эти частицы постоянно диффундируют поперек линий течения газов, поэтому степень очистки газов от мелких частиц тем выше, чем меньшая скорость прохождения отработавших газов через пористый фильтр.

Следующим фактором, который влияет на процессы улавливания твердых частиц в фильтрующем элементе, является седиментация. Она проявляется лишь тогда, когда частицы пребывают внутри достаточно времени, чтобы осесть.

Относительно отработавших газов дизелей важно, в зависимости от конструктивных особенностей, скоростного и нагрузочного режимов знать закон распределения твердых частиц по отдельным фракциям. Функция логарифмически нормального распределения массы твердых частиц по диаметрам имеет вид:

$$D(\delta) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}\,\lg\sigma} \int_{-\infty}^{\lg\sigma} \exp\left(-\frac{(\lg\sigma - \lg\delta_{50})^2}{2\lg^2\sigma}\right) d\lg\delta, \quad (3)$$

где δ – размер (диаметр) частицы, мкм; δ_{50} – медиана распределения массы частиц, медианый диа-

метр, мкм, Это размер частиц, при которых масса всех т частиц мельче или крупнее; δ_{50} составляет 50 %; D – проход, %, доля массы т и прошедшие через СВС-блок с заданной пористостью; $\lg\sigma$ – стандартное среднеквадратичное отклонение величины логарифмов диаметров от их среднего значения; $\lg^2\sigma$ – дисперсия величины $\lg\sigma$.

Интеграл, входящий в выражение (3) не может быть выражен через элемент функции. Для вычисления искомой функции ее преобразуют в функцию нового аргумента t – нормального распределения величины. Среднее значение ее равно 0.

$$t = \frac{\lg\delta - \lg\delta_{50}}{\lg\sigma},$$

После замены:

$$D(\delta) = F(t) = F\left(\frac{\lg\sigma - \lg\delta_{50}}{\lg\sigma}\right) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt,$$

Эффективность захвата твердых частиц фильтром в результате диффузии описывается выражением:

$$\eta_D = \frac{A_{тч}}{(R_{ог}\cdot\bar{\upsilon}\cdot r_{тч})^{2/3}},$$

Однако в этом выражении неопределенным остается коэффициент $A_{тч}$. Получение его величины связано с экспериментом для конкретных фильтров и конкретных дизелей. С другой стороны эксперимент пока остается единственным путем его определения.

Эффективность захвата частиц за счет сил инерции определяется критерием Стокса [4]:

$$Stk = \frac{2r_{тч}^2\,\rho_{тч}\,\bar{\upsilon}}{9\,\mu_{ог}\,R_{ог}},$$

Инерционный захват увеличивается с увеличением среднего диаметра пор $d_п$, плотности отработавших газов, скорости фильтрации газов:

$$\eta_{ин} = \frac{Stk^2}{Stk^3 + 0,77\,Stk^2 + 0,22},$$

Если представить пористый СВС-фильтр как многослойную структуру с толщиной $\delta_{ст}$ и толщиной слоя $\delta_{сл}$, можно представить забивание верхнего слоя фильтра следующим выражением:

$$\varphi_2 = \varphi_1\cdot\exp\left(-\frac{\tau_{ст}\cdot\bar{\upsilon}\cdot\delta_{ст}(1 + r_{тч}/\delta_{сл})}{2\sqrt{3}(r_{тч} + \delta_{сл})\delta_{сл}}\right),$$

где $\tau_{ст}$ – время прохождения газом стенки фильтра; φ_1 – забивание фильтра начальное.

Коэффициент поглощения твердых частиц пористым СВС-фильтром вследствие зацепления можно описывать [2]:

$$\delta_п = \frac{\delta_{ст}}{2\delta_{сл}^2\cdot\sqrt{3}}\left(\tau_{ст}\cdot\bar{\upsilon} + \frac{3r_{тч}^2}{\delta_{ст} + \delta_{сл}}\right),$$

В порах с извилистостью, какие и есть в СВС-материалах, существуют силы:

– центробежная $F_{цбс} = m_{тч}\,l_{вр}\,\omega_{тч}$;

– трения $F_{тр} = R_{ст}\,\upsilon_р$;

где $m_{тч}$ – масса твердой частицы; $l_{вр}$ – расстояние от частицы до оси вращения; $\omega_{тч}$ – угловая скорость твердой частицы; $\upsilon_р$ – радиальная скорость.

Масса твердой частицы может быть условно представлена как:

$$m_{тч} = V_{штч}(\rho_{тч} - \rho_{ог}),$$

где $V_{штч}$ – объем частицы при ее условно шаровой форме, $V_{штч} = \frac{4}{3}\pi r_{тч}^3$, $r_{тч}$ – радиус условной шаровой частицы.

Учитывая, что $\omega_{тч} = \frac{\upsilon_{tg}}{l}$; $F_{цбс} = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{тч} - \rho_{ог})\cdot\upsilon_{tg}^2/l$ и в случае равновесного движения $F_{цбс}=R_{ст}v_р$, радиальная скорость частицы, движущейся в поле центробежной силы, будет:

$$\upsilon_р = \frac{2r^2\,\upsilon_{tg}(\rho_{тч} - \rho_{ог})}{9l\,\mu_{ог}},$$

а время падения твердых частиц составит:

$$\tau_{пад} = \frac{4,5\,\mu_{ог}\,h_у}{(\rho_{тч} - \rho_{ог})\,g\,r^2},$$

где $h_у$ – высота установки фильтра твердых частиц. Теоретические скорости движения твердых частиц можно вычислить на основании выше приведенных зависимостей для условно принятых частиц шарообразной формы, а при испытании фильтров для очистки газов целесообразно отдельно определить скорости осаждения частиц различного происхождения.

3. Противодавления, создаваемые пористыми проницаемыми фильтрами твердых частиц на выпуске дизеля

Выполняя свои функции по очистке отработавших газов от твердых частиц, фильтры создают на выпуске значительные противодавления, которые, в свою очередь, влияют на пропускную способность, а также мощность и часовой расход топлива печью или дизелем. По мере осаждения на поверхности пористого фильтра и проникновения в поры твердых частиц возрастает сопротивление движению отработавших газов. Для пористых бумажных и тканевых фильтров очистки воздуха от пыли [5] предложено выражение для определения гидравлического сопротивления, которое по аналогии можно в первом приближении использовать и для пористых СВС-материалов:

$$\Delta P = \frac{817\,\mu_{ог}\overline{\upsilon_{ог}}(1 - n_{тч})}{d_{тч}^2\cdot n_{тч}}\times$$
$$\times(0,82\cdot 10^6\,d_{тч}^{0,25}n_{фм}(1 - n_{тч})^{2/3}n_0 + \upsilon_{ог}\,t_р\,K_Д\,/\,\rho_{тч}),$$

где $\upsilon_{ог}$ – средняя скорость отработавших газов, м/с; $d_{тч}$ – средний диаметр твердых частиц, $n_{тч}$ – порис-

тость твердых частиц; $n_{фм}$ – пористость фильтрующего материала; $\rho_{тч}$ – плотность твердых частиц, кг/м^3; $t_р$ – время между регенерациями фильтра, ч; $\mu_{ог}$ – динамическая вязкость отработавших газов; n_0 – число твердых частиц в м^3 газа; $K_Д$ – показатель дымности отработавших газов по оптическому дымомеру.

Суммарное противодавление, создаваемое фильтром твердых частиц можно представить как сумму противодавлений, создаваемых отдельными ступенями очистки:

$$\Delta P = \Delta P_{\mathrm{I}} + \Delta P_{\mathrm{II}} + \Delta P_{\mathrm{III}} + \cdots + \Delta P_j .$$

При расчете фильтра твердых частиц с блоками из СВС-материалов предлагается использовать показатель удельной газовой нагрузки. Исходя из того, что объемный расход газов с учетом особенностей нагрузки и условий сгорания в дизеле определяется по выражениям (1) и (2), показатель удельной газовой нагрузки можно представить для первого фильтрующего элемента:

$$q_{ог} = \frac{V_{ог}}{F_{тч}},$$

т.е. одновременно речь идет о скорости фильтрации через пористую стенку. Это нам дает возможность исходить из скоростей фильтрации, рекомендуемых в предшествующих исследованиях [6].

Предварительные экспериментальные исследования, проведенные авторами, показали, что ухудшение показателей работы дизеля для фильтров с различной пористостью происходит вначале плавно до некоторого предела $\Delta P_{пр}$, а затем показатели резко ухудшаются. Величину $\Delta P_{пр}$ необходимо выбирать таким образом, чтобы превышение ее не наступало раньше времени между техническими обслуживаниями ТО-2. В противном случае сажевый фильтр оборудуется системами регенерации в процессе эксплуатации. Время между регенерациями иногда называют сажеемкостью фильтров.

Исходя из того, что для более полного поглощения фильтрами твердых частиц необходимо время пребывания газов в пористой стенке не менее $\tau_п \approx 4{,}6 \cdot 10^{-2}$ с, определяют объемную скорость, имеющую связь с временем пребывания в пористой стенке как $\omega_0 = 3600/\tau_п$. Из условия знания объемной скорости определяется объем пористой массы:

$$V_{пм} = \frac{V_{ог} \cdot \tau_п}{3600}.$$

При создании высокоэффективных фильтров по очистке отработавших газов пыли использованы положения, изложенные В.И. Волковым [7]. Для режима турбулентной фильтрации в существенно нелинейном режиме, когда коэффициент сопротивления фильтра квадратично зависит от числа Рейнольдса. Своими предварительными исследованиями мы обнаружили такую зависимость для фильтров из СВС-материалов.

Если СВС-материалы в некотором приближении рассматривать как зернистые среды, то за основу при описании турбулентной фильтрации можно положить модель Эргана.

Существование турбулентных пульсаций газов заложено своим дискретным принципом работы механизмов газораспределения дизелей и здесь в основу влияния может быть использована система уравнений Навье-Стокса. Решение задач, поставленных В.И. Волковым по определению критических чисел Рейнольдса, начиная с которых движение газов в порах СВС-структур становится турбулентным независимо от проходного сечения, выявление составляющих пульсаций скорости, приводящих к квадратической зависимости сопротивления на выпуске от числа Рейнольдса, приводит к очень важному положению, позволяющему решать задачу относительно полного перепада давления по толщине пористой стенки. При этом будем полагать, что рассмотрение газодинамики внутри пористой стенки базируется на двух моделях: законе Дарси при низких числах Рейнольдса и двучленном уравнении Эргана – при высоких числах Рейнольдса, связывающих ΔP со среднерасходной скоростью внутри пористого слоя [5]:

$$\Delta P / \delta_{ст} = \frac{150 \mu_{ог} \overline{\upsilon_{ог}} (1 - n_{фм})^2}{n_{фм}^3 \cdot d_ш} + \frac{1{,}75 \rho_{ог} \upsilon_{ог}^2 (1 - n_{фм})}{n_{фм}^3 \cdot d_ш},$$

где $\Delta P/\delta_{ст}$ – полный перепад давления на толщине стенки $\delta_{ст}$; $\bar{\upsilon}_{ог}$, $\rho_{ог}$, $\mu_{ог}$ – соответственно расходная скорость газа в поре, плотность и динамическая вязкость газов; $n_{фм}$ – пористость; $d_ш$ – диаметр шарика.

Уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности для зернистого слоя, где координата z направлена по направлению расходной скорости, представляется в виде:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} = \\
&= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2} \right), \\
&\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} = \\
&= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial z^2} \right), \\
&\frac{\partial U_z}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_z}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_z}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = \\
&= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right).
\end{aligned} \qquad (4)$$

Уравнение неразрывности запишется следующим образом:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \qquad (5)$$

Из симметрии физической картины течения следует, что

$$U_x = U_y; \quad \frac{\partial U_z}{\partial x} = \frac{\partial U_z}{\partial y}. \qquad (6)$$

С учетом соотношения (6) уравнения (4) можно переписать в другом виде:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t}+2\cdot U_x\frac{\partial U_x}{\partial x}+U_z\frac{\partial U_x}{\partial z}=$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(2\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_x}{\partial z^2}\right),$$
$$\frac{\partial U_z}{\partial t}+2\cdot U_x\frac{\partial U_z}{\partial x}+U_z\frac{\partial U_z}{\partial z}=$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\left(2\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}\right).$$

Решение системы найдено в виде стоячих волн, а окончательно уравнение Эргана получило вид:

$$\Delta P/\delta_{cm}=\frac{178\mu_{og}\overline{\upsilon_{og}}(1-n_{\phi м})^2}{n_{\phi м}^3\cdot d_ш^2}+\frac{1,5\rho_{og}\upsilon_{og}^2(1-n_{\phi м})}{n_{\phi м}^3\cdot d_ш}.$$

Последнее выражение, как наиболее верно описывающее явление оказалось удобным при расчете толщины стенки пористого СВС-фильтра. Нами при условии выполнения ограничений по противодавлениям получено выражение:

$$\Delta P_j=\frac{K_к\delta_{cm}\mu_m\upsilon_{og}(1-n_{\phi м})(2,4-\ln \mathrm{Re}_j)}{F_б n_{\phi м}\bar{r}(2-\ln \mathrm{Re}_j)}.$$

Это выражение можно использовать с условием создания допустимых противодавлений выпуску фильтрами нескольких ступеней *j* очистки.

4. Температурное состояние пористых СВС-блоков

Температурное состояние фильтров можно определить с учетом отвода тепла через стенки и подвода – с отработавшими газами и за счет доокисления продуктов неполного сгорания:

$$T_{pj}=T_{1j}+(M_{og}H_{CO}(C_{CO}^{1j}-C_{CO}^{2j})+H_{тч}(C_{тч}^{1j}-C_{тч}^{2j})+$$
$$+H_{CH}(C_{CH}^{1j}-C_{CH}^{2j}))-\frac{\frac{dQ_w}{dt}\tau_{pj}}{c_{pj}\cdot M_{og}},$$

где по участкам $c_{pj}=\frac{P_j}{R\cdot T_j}$; $M_{og}=\frac{\omega_{pj}\cdot\rho_{og}}{\mu_{og}}$; $\tau_{pj}=\frac{\omega_{jp}}{V_{og}}$;

$$\frac{dQ_w}{dt}=\alpha_m F_{pj}(T_j-T_{wj}).$$

Общее количество тепла, теряемое 1 м² поверхности корпуса фильтра путем лучеиспускания и конвекции можно рассчитать по выражению:

$$Q_w=K_{лu}\left(\left(\frac{T_{пк}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right)+K_\phi(T_{пк}-T_0)^{1,23},$$

где $T_{пк}$ – температура поверхности стального корпуса; T_0 – температура окружающей среды; $K_{лu}$ – константа лучеиспускания; для листовой стали $K_{лu}$=2,8; K_ϕ – конвективный фактор; для средних атмосферных условий K_ϕ=3,5.

Часовые выбросы с отработавшими газами продуктов неполного сгорания рассчитывают по выражению:

$$M_f=\frac{V_{og}\cdot\Delta C_f}{1000}.$$

Теплота, получаемая вследствие сгорания СО, СН, ТЧ определяется как:

$$Q_{CH}=M_{CH}H_{CH}=50034\cdot M_{CH},\quad кДж/ч;$$
$$Q_{ТЧ}=M_{ТЧ}H_{ТЧ}=34034\cdot M_{ТЧ},\quad кДж/ч;$$
$$Q_{CO}=M_{CO}H_{CO}=10091\cdot M_{CO},\quad кДж/ч.$$

Учет действительного теплового состояния фильтрующих блоков дает возможность рассчитывать скорости выгорания сажи на поверхности фильтров, используя реакции:

$$C+O_2\xrightarrow{K_{+1}}CO_2,$$
$$2C+O_2\xrightarrow{K_{+2}}2CO,$$
$$C+H_2O\xrightarrow{K_{+3}}CO+H_2.$$

Скорости этих реакций зависят от температуры, а константы скоростей имеют вид:

$$K_{+1}=1,085\cdot10^6 P_{O_2}\cdot T^{-0,5}\exp\left(-\frac{164500}{RT}\right),$$
$$K_{+2}=14,3\cdot10^{-4}P_{O_2}T^{-0,5}\exp\left(-\frac{93660}{RT}\right),$$
$$K_{+3}=1,0125\cdot\left(\frac{P_{H_2O}P_{CO_2}}{P_{H_2}P_{CO}}\right)^{0,5}\exp\left(-\frac{58200}{RT}\right).$$

На основе выражений, представленных в разделах 1–3 настоящей работы, был разработан программный комплекс для моделирования течения газов через пористую проницаемую стенку.

Результаты работы позволяют определить как площадь поверхности фильтрующего элемента, так и его геометрические характеристики.

При расчетах фильтрующих элементов для химических производств вводились условия с учетом специфики, производительности источников выбросов, температуры выбросов и их химический состав.

5. Результаты моделирования

Для получения основных конструктивных размеров пористых проницаемых фильтров для очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц была использована модель, в основу которой были положены выражения, приведенные в предыдущих разделах. Расчеты выполнены для дизелей Д-461 (6ЧН13/14) и Д-442 (4ЧН13/14). Конкретизация двигателей необходима в виду того, что двигатели имеют различный рабочий объем, различные частоты вращения и различные степени форсировки по среднему эффективному давлению, а, следовательно, различные расходы отработавших газов, различные выбросы твердых частиц, различный дискретный состав твердых частиц.

В результате моделирования и расчетов были предложены варианты основных конструктивных

параметров. Основные результаты расчетов приведены в таблице, где показаны варианты конструктивных элементов фильтров твердых частиц.

Таблица. *Параметры дизелей и нейтрализаторов отработавших газов*

Параметры дизеля и нейтрализатора	Обозначения	Размерность	Типы дизеля	
			Д-461	Д-442
Полный рабочий объем цилиндров	$i\,V_h$	л	11,6	7,44
Количество цилиндров	i	шт.	6	4
Мощность номинальная	$N_{ен}$	кВт	125,6	87,7
Часовой расход топлива	$G_т$	кг/ч	29,3	19,1
Часовой расход воздуха	$Q_в$	$м^3$/ч	714	421
Частота вращения коленвала	$n_н$	$мин^{-1}$	1700	1900
Объем пористой массы	$V_{пм}$	$м^3$	$1{,}22 \cdot 10^{-2}$	$0{,}73 \cdot 10^{-2}$
Толщина стенок блоков	$\delta_{ст}$	м	$12 \cdot 10^{-2}$	$12 \cdot 10^{-2}$
Количество блоков	$n_б$	шт.	1	1
Противодавление выпуску	ΔP	кПа	5,5	5,1
Извилистость пор	$\xi_п$	–	1,1	1,1

При определении основных параметров фильтров с СВС-блоками учитывались особенности, связанные с тем, что при увеличении толщины стенки блока удельная поверхность возрастает непропорционально. Это, в частности, объясняется тем, что число сквозных пор уменьшается, появляется большое количество пор с "тупиками", извилистость пор увеличивается.

Учитывались положения об унификации блоков по отношению рядам двигателей для обеспечения определенной номенклатуры фильтров.

Расчеты показали, что при допустимых противодавлениях на выпуске до 5,9 кПа при одной ступени обеспечивается очистка 70 % от твердых частиц.

Конструктивные размеры блоков были положены в основу создания модификаций фильтров для очистки отработавших газов дизелей от твердых частиц.

В результате математического моделирования удалось определить объем пористой массы со средним диаметром пор 120 мкм, количество блоков, толщину их стенок, а также противодавление выпуску, создаваемое нейтрализаторами. Эти данные для дизелей связаны в таблице.

6. Выводы

В результате изучения процессов фильтрации отработавших газов дизелей через пористую стенку СВС-блока была получена математическая модель процессов фильтрации и выгорания сажи, включая блоки: определения состояния отработавших газов на входе в фильтр; процессы фильтрации газов в пористых проницаемых СВС-блоках; определение противодавлений, создаваемых пористыми блоками на выпуске дизеля и температурного состояния пористых СВС-блоков. Модель дала возможность учесть выгорание сажи на поверхности фильтров для расчета действительного теплового состояния блоков. Математическая модель реализована в виде программного для ПЭВМ и использована при оценке конструктивных параметров фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смайлис В.И. Малотоксичные дизели. – Л.: Машиностроение, 1972. – 128 с.
2. Евстигнеев В.В., Вольпе Б.М., Горколь Д.А. Создание принципов обобщений СВС-технологий дисперсного композиционного материала // Труды АлтГТУ. Вып. 1. – Барнаул, 1993. – С. 3–18.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: АН СССР, 1956. – 352 с.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л., 1974. – 280 с.
5. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: АН СССР, 1956. – 352 с.
6. Груданов В.Я. Физико-химические теплообменные процессы в каталитических нейтрализаторах с утилизацией теплоты отработавших газов // Двигателестроение. – 1991. – № 1. – С. 47–49.
7. Волков В.И. Режим турбулентной фильтрации // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сб. статей. – Барнаул, 1999. – С. 72–77.